

論文 ステンレス鉄筋と普通鉄筋を併用使用した RC 部材の鉄筋腐食時の外観変状と構造性能

山下 諒輔^{*1}・下村 匠^{*2}・山口 貴幸^{*3}

要旨： ステンレス鉄筋は耐食性が高くコンクリート構造物の耐久性向上の有効策であると考えられる。ステンレス鉄筋の実用に向けての一検討として、RC 部材中の鉄筋の一部または全部にステンレス鉄筋を用いた RC 部材の鉄筋腐食時の腐食ひび割れなどの外観変状ならびに耐荷力などの構造性能の低下に関する実験的検討を行った。その結果、ステンレス鉄筋がコンクリート中で腐食した場合の部材の構造性能の低下は普通鉄筋と同様の傾向であること、併用使用した場合普通鉄筋が腐食してもステンレス鉄筋が健全であれば構造性能の著しい低下はないことが示された。

キーワード： ステンレス鉄筋, 鉄筋腐食, 腐食ひび割れ, 塩害

1. はじめに

塩害によるコンクリート中の鋼材腐食は、日本海沿岸などの厳しい腐食性環境下におけるコンクリート構造物の主な劣化要因である。耐食性の高いステンレス鉄筋の使用は塩害対策の有効な手段の一つと考えられる。

ステンレス鉄筋はその高い耐食性ゆえ、逆に腐食を想定した研究はあまり行われていない。しかしさまざまな条件下の社会基盤構造物に広く実用することを考えると、きわめて起こりにくいことではあるが、ステンレス鉄筋が万一腐食した場合に構造物の性能にどのような不具合が生じるか、普通鉄筋が腐食した場合と異なるのか、などを確認しておくべきである。

実構造物への適用の際、最外縁など構造物中の最も厳しい箇所にのみステンレス鉄筋を用い、他は普通鉄筋を用いるいわゆる併用使用も選択肢のひとつとして考えられる。その場合、厳しい環境下では普通鉄筋が腐食することも考えられる。万一普通鉄筋のみが著しく腐食した場合、構造物にどのような変状が生じ、構造性能がどうなるのか検討しておく必要がある。

以上の問題に対し、本研究では、ステンレス鉄筋を用いた RC 部材に電食により強制的に腐食を導入し、腐食時の変状と構造性能に関する実験的検討を行った。

会で行われた鉄筋が腐食したRC部材の構造性能に関する共通試験（Bench Mark Test, 以下BMT）¹⁾に準じ、小型単鉄筋RC供試体を電食により促進腐食をさせ曲げ載荷試験を行った。

シリーズ2は、ステンレス鉄筋と普通鉄筋を併用使用したシリーズであり、二段配筋したRC供試体を電食により促進腐食後に曲げ載荷試験を行った。

2.2 供試体概要

各供試体の条件と使用鉄筋を表-1に示す。供試体は表-2に示す鉄筋と表-3に示す配合のコンクリートを用

表-1 供試体一覧

試験体名		目標質量減少率(%)		使用鉄筋	
		普通鉄筋	ステンレス鉄筋	主鉄筋	スターラップ
シリーズ1	SUS0	—	0(健全)	SUS304-SD295B	SUS304
	SUS7	—	7		
	SUS15	—	15		
	SUS30	—	30		
	STL0	0(健全)	—	SD345	SD295A
	STL7	7	—		
	STL15	15	—		
	STL30	30	—		
シリーズ2	N-S	0(健全)	0(健全)	上段 SD345 下段 SUS304-SD295B	SD295A
	N10-S	10	0(健全)		
	N12-S8	12	8		
	N20-S	20	0(健全)		

表-2 使用鋼材

鉄筋の種類	鋼種	径	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
ステンレス鉄筋	SUS304-SD295B	D13	309.4	187
	SUS304	D5	—	—
普通鉄筋	SD345	D13	397.9	183
	SD295A	D6	—	—

2. 実験概要

2.1 実験シリーズ

実験シリーズは2シリーズより構成されている。

シリーズ1は、ステンレス鉄筋が腐食した際のRC部材の変状と構造性能の変化の基本的傾向を把握するためのシリーズであり、供試体および試験方法は土木学会331委員

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

*3 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 技術職員 修士(工学) (正会員)

表-3 示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
20	8	60	47	6	168	280	864	985	C×0.4%

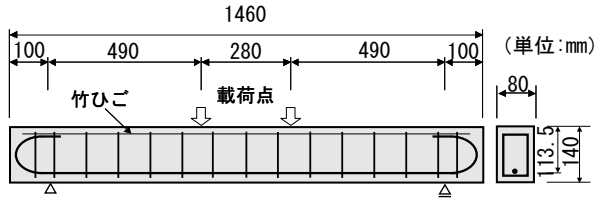


図-1 実験供試体 (シリーズ 1)

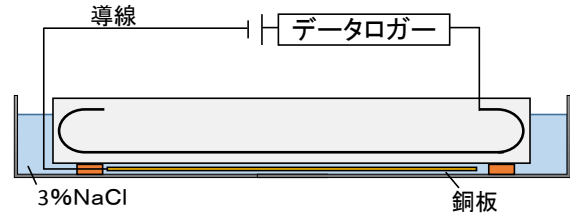


図-3 電食概要図 (シリーズ 1)

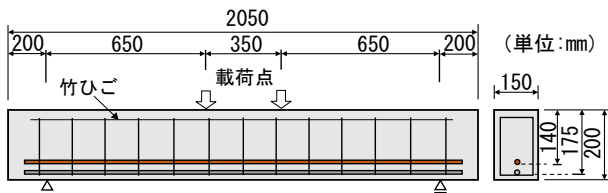


図-2 実験供試体 (シリーズ 2)

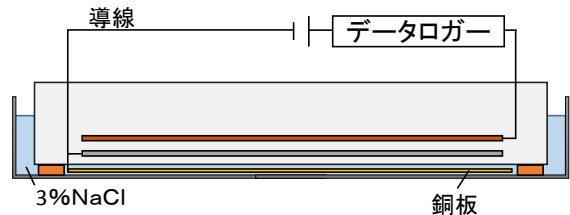


図-4 電食概要図 (シリーズ 2)

いて作製した。

(1) シリーズ 1

供試体形状および寸法を図-1に示す。主鉄筋はD13、かぶりは20mmである。スターラップには、普通鉄筋の供試体はD6(SD295A)をステンレス鉄筋の供試体はD5(SUS304)を100mm間隔で配置した。

主鉄筋の腐食の影響のみを検討するため、スターラップは電食試験中も腐食しないようにした。普通鉄筋のみを用いた供試体ではBMTに倣い、主鉄筋と接触するスターラップ下部に絶縁テープ(ビニルテープ、ブチルゴムテープ等)を巻きつけることによりスターラップの腐食を防ぐことができたが、ステンレス鉄筋を用いた場合、同じ方法ではスターラップの腐食が防げないことが事前検討の結果より明らかとなった。そこで、試行錯誤の結果スターラップの腐食を防ぐためにエポキシ樹脂により全面被覆し絶縁する方法を採用した。組立て筋には、スターラップの配置間隔を確保できる程度の剛性を有する絶縁材料として竹ひごを使用し、結束線にはプラスチック製のケーブルタイを用いた。

(2) シリーズ 2

供試体形状および寸法を図-2に示す。普通鉄筋、ステンレス鉄筋を組み合わせで二段配筋したRCはりとした。電食による腐食ひび割れが底面に入りやすいように、下段鉄筋、上段鉄筋ともに最小かぶりが底面方向になるようにした。150mm間隔でスターラップを配置した。スターラップの絶縁方法や組立て筋、結束線の使用方法是シリーズ1と同様とした。

2.3 電食試験

(1) 試験方法

電食は、供試体を28日間養生した後に開始した。電食試験の方法はBMTに準じた。電食の概要図を図-3および図-4に示す。腐食量の調整については、既往の研究²⁾により得られた積算電流量と腐食量の関係式を参考に通電時間を決定した。シリーズ2では、普通鉄筋のみを腐食させるためにステンレス鉄筋と銅板を直接つなぎ陰極とした。

腐食の程度は主鉄筋全長の平均質量減少率で表す。シリーズ1では、目標質量減少率は0%, 7%, 15%, 30%の計4水準とした。シリーズ2では、上段の普通鉄筋の目標質量減少率により0%, 10%, 20%の3水準および上段鉄筋を12%, 下段鉄筋を8%腐食させた1水準の計4水準である。平均質量減少量を測定する際、載荷試験により等曲げ区間の鉄筋が伸び、せん断区間よりも質量減少率が大きく表現されることが考えられる。シリーズ1ではBMT同様、本実験での腐食の程度および供試体の形状・寸法ではその影響は小さいものと思われる。シリーズ2では、載荷試験による等曲げ区間の伸びを考慮した。

(2) 測定項目および測定方法

腐食ひび割れ幅は、電食試験終了後に供試体底面の腐食ひび割れ幅を50mm間隔で測定した。測定にはマイクロスコプを用いた。腐食ひび割れ幅の測定位置は、断面減少率測定におけるノギスによる鉄筋径の測定位置と対応する。

鉄筋の質量減少率は、載荷試験終了後の供試体から主鉄筋をはつり出し、JCI-SCI³⁾に従い 10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液 (60℃) に 24 時間漬浸し腐食生成物を除去し、まず主鉄筋全長の平均値を測定した。その後、主鉄筋を曲げおよびせん断スパンに切断し、それぞれの区間の長さおよび質量を測定し、健全時の単位長さあたりの質量から、各区間質量減少率を求めた。

鉄筋の断面減少率は、鉄筋をはつり出した後、腐食ひび割れ幅測定位置に対応する位置における鉄筋径をノギスで測定することにより求めた。鉄筋径は BMT 同様、目視により最小と判断できる直径方向を対象に測定をし、鉄筋断面積はこの最小鉄筋径を直径とする断面積を仮定して算出した。断面減少率は、腐食鉄筋断面積を健全鉄筋断面積で除すことで求めた。

2.4 載荷試験

載荷方法および計測項目を図-5 に示す。シリーズ 1 供試体では、スパン長 1460mm に対して等曲げ区間 280mm、シリーズ 2 供試体ではスパン長 2050mm に対して等曲げ区間 350mm の、対称 2 点一方単調載荷曲げ試験とした。計測項目は、載荷荷重、中央・支点変位、コンクリートのひずみである。

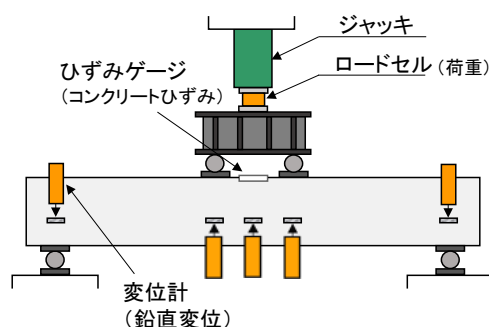


図-5 載荷試験方法および計測項目

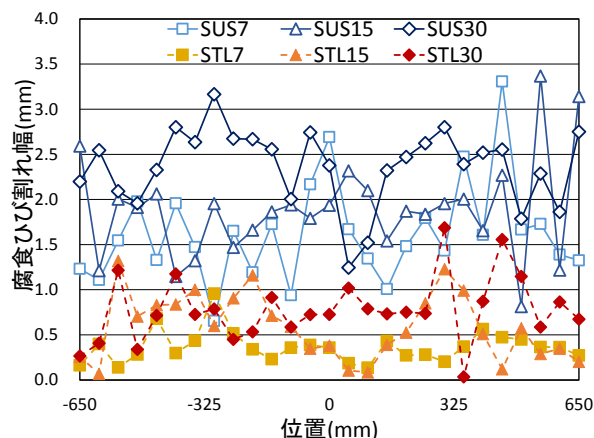


図-6 腐食ひび割れ幅の軸方向分布（シリーズ 1）

3.鉄筋の腐食性状および腐食ひび割れ性状

3.1 シリーズ 1

腐食ひび割れは底面に主鉄筋に沿って発生した。図-6 に示す供試体底面の腐食ひび割れ幅の軸方向分布を見ると、ステンレス鉄筋の腐食ひび割れ幅は普通鉄筋と比較して全体的に大きくなっている。図-7 に示す供試体底面の平均腐食ひび割れ幅と主鉄筋の平均断面減少率の関係から、ステンレス鉄筋における鉄筋の断面減少率に対するひび割れ幅は、普通鉄筋と比較し全体的に大きい傾向がみられた。

図-8 に電食後の主鉄筋の腐食性状（錆を除去した状態）を示す。普通鉄筋は節の消失や、局所的な断面欠損が発生しているのに対して、ステンレス鉄筋の特徴として全体的に直径 1～5mm 程度の孔が発生しスポンジ状に欠損が生じることが確認できた。これはステンレス鉄筋が有する強固な不動態皮膜が Cl⁻ の作用により局部的に破壊され、その部分から優先的に溶解したことが原因と考えられる⁴⁾。

図-9 にステンレス鉄筋と普通鉄筋の鉄筋質量より算出した質量減少率とノギス鉄筋径より算出した断面減少率の関係を示す。図中の実線は質量減少率と平均断面減少率が等しいことを示す。両鉄筋共に質量減少率が断面減少率をやや過小評価する傾向がみられた。図-8 より電食でのステンレス鉄筋と普通鉄筋の腐食形態は異なったが、質量減少率と断面減少率の関係は同様の傾向を示

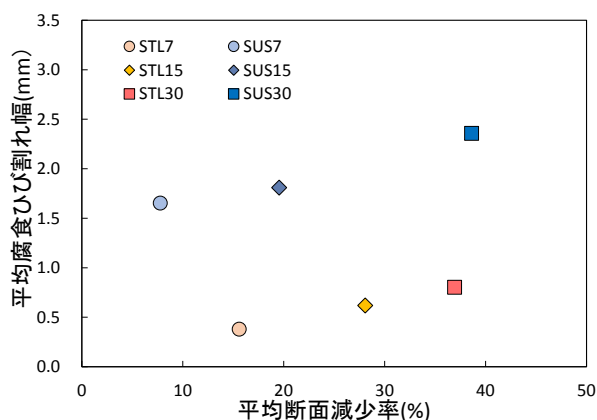


図-7 平均ひび割れ幅－平均断面減少率関係（シリーズ 1）



図-8 鉄筋腐食性状（シリーズ 1）

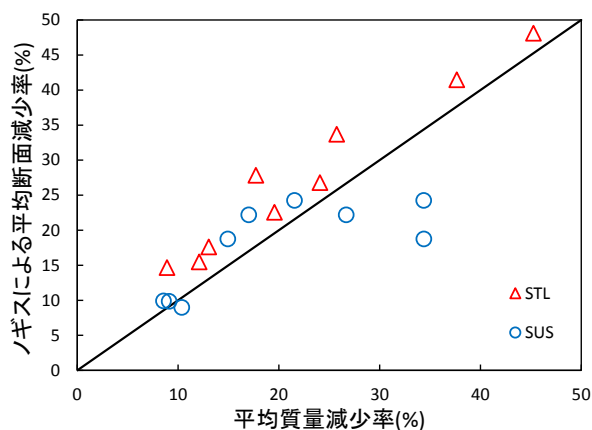


図-9 平均断面減少率-平均質量減少率関係
(シリーズ 1)

していることが分かる。しかし、ステンレス鉄筋は腐食が 20%以上と過度に進展すると、ノギスによる断面積の減少に寄与しない孔食によると考えられる質量減少がみられた。

このような腐食形態の違いが、同一腐食量時におけるコンクリートに作用する膨張圧の違いを生じさせ、ステンレス鉄筋の腐食ひび割れ幅を増大させた可能性がある。しかし、その仮説の検証には至っておらず、検討が続いている。またこの傾向が電食に固有のものなのか、自然環境下における腐食においても起こるのかどうかについても明らかにしなければならない。

3.2 シリーズ 2

電食後の主鉄筋の腐食性状は、普通鉄筋およびステンレス鉄筋共にシリーズ 1 (図-8) と大差なかった。

図-10 よりシリーズ 1 (図-6) と同様に普通鉄筋のみを腐食させた N10-S と N20-S では腐食率の増加に伴い、底面の腐食ひび割れ幅は大きくなる傾向がみられた。N12-S8 供試体は、下段のステンレス鉄筋も腐食しているため腐食ひび割れ幅は全体的に大きくなった。N10-S 供試体および N20-S 供試体では、下段のステンレス鉄筋が腐食していないに関わらず、上段の普通鉄筋より発生した腐食ひび割れがステンレス鉄筋周辺を経て供試体底面に到達した (図-11)。このようなひび割れが著しく拡大した場合、たとえステンレス鉄筋は腐食していなくてもコンクリートとの付着が低下し、部材の構造性能に支障をきたすことがないか確認することが今回の実験の目的のひとつである。

図-12 に鉄筋の質量減少率と断面減少率の関係を示す。両者の関係は、シリーズ 1 の腐食の程度が小さい範囲と同様の傾向である。

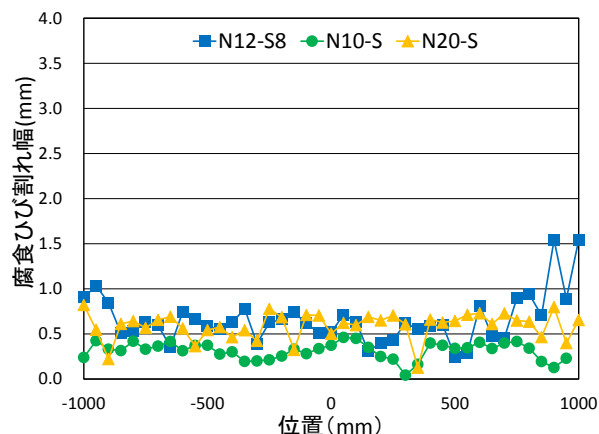


図-10 腐食ひび割れ幅の軸方向分布 (シリーズ 2)

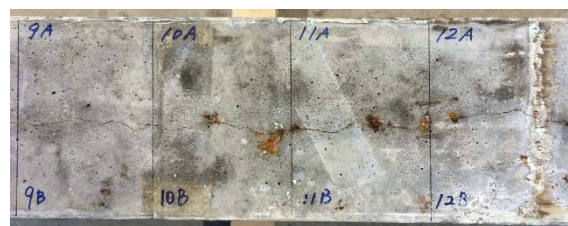


図-11 N10-S 腐食ひび割れ
(シリーズ 2)

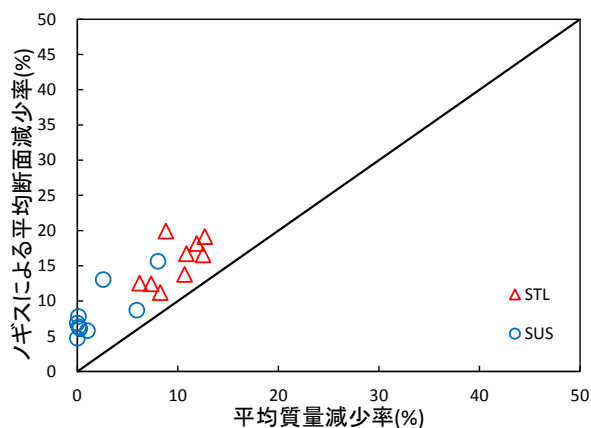


図-12 平均断面減少率-平均質量減少率関係
(シリーズ 2)

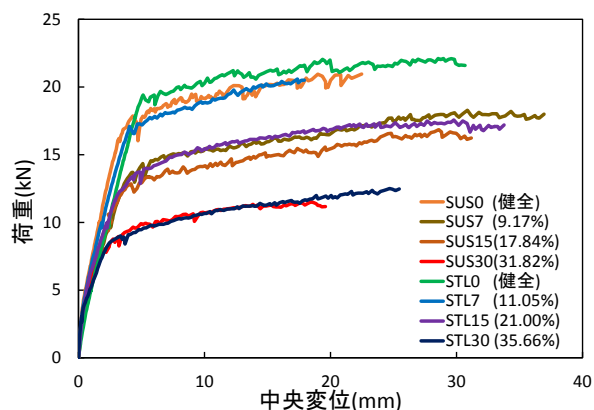


図-13 荷重-中央変位関係 (シリーズ 1)

表-4 荷重試験結果

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	質量減少率(%)		降伏 荷重 (kN)	終局 荷重 (kN)	降伏 変位 (mm)	終局 変位 (mm)	降伏 荷重比	終局 荷重比
		普通 鉄筋	ステン レス鉄 筋						
SUS0	34.7	—	0.00	17.9	21.0	4.32	22.5	1.00	1.00
SUS7	33.4	—	9.17	14.4	18.0	5.11	30.9	0.80	0.86
SUS15	34.3	—	17.8	13.3	16.2	5.28	28.2	0.74	0.77
SUS30	35.8	—	31.8	9.94	11.52	5.33	18.5	0.56	0.64
STL0	31.0	0.00	—	19.4	21.6	6.01	29.1	1.00	1.00
STL7	29.8	11.1	—	17.3	20.5	4.86	17.4	0.89	0.95
STL15	31.4	21.0	—	15.5	17.6	9.46	29.8	0.80	0.81
STL30	31.0	35.7	—	9.59	12.6	5.21	25.8	0.55	0.62
N-S	34.7	0.00	0.00	36.0	42.0	6.78	38.4	1.00	1.00
N10-S	36.7	7.18	1.01	35.2	43.1	5.72	39.7	0.98	1.03
N12-S8	33.4	11.4	7.38	33.7	42.5	6.28	76.1	0.94	1.01
N20-S	38.5	12.8	1.03	35.6	42.7	6.05	36.7	0.99	1.02

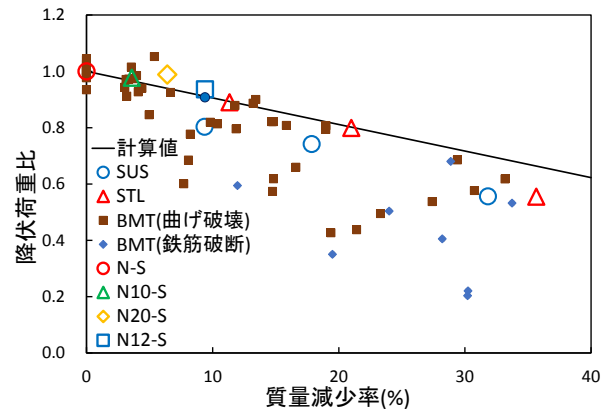


図-14 降伏荷重比－質量減少率関係

4. 鉄筋腐食後の構造性能

4.1 シリーズ 1

(1) 荷重－変位関係

シリーズ 1 の荷重－中央変位関係を図-13 に示す。ステンレス鉄筋および普通鉄筋共に主鉄筋の質量減少率が増加するに連れて、降伏荷重および終局荷重は低下した。全供試体において、主鉄筋の降伏後に圧縮緑コンクリートの圧壊で終局に至る曲げ引張破壊であった。各供試体の降伏荷重、終局荷重は表-4 に示す。

(2) 鉄筋の質量減少率と降伏荷重比の関係

図-14 に各供試体の降伏荷重比と主鉄筋の関係を示す。降伏荷重比は各腐食試験体の降伏荷重を同じ鉄筋を用いた健全供試体の荷重の実験値で除して求めた。図中の実線は主鉄筋の断面減少を考慮して RC 断面の一般的な曲げ計算方法に則り求めた降伏荷重である。図には普通鉄筋を用いて過去に行われた BMT¹⁾の試験結果もプロットしている。今回の試験結果はステンレス鉄筋も普通鉄筋もすべて過去の BMT の試験結果の群中にあることが確認できる。この結果より、ステンレス鉄筋が万一コンクリート中で腐食した場合でも、部材の構造性能の低下の傾向は普通鉄筋を用いた場合と同様であるといえる。ステンレス鉄筋を用いた供試体は腐食ひび割れ幅が大きかったが、それは構造性能に影響するほどではなかったとことが確認された。

4.2 シリーズ 2

(1) 荷重－変位関係

シリーズ 2 の荷重－中央変位関係を図-15 に示す。破壊モードはすべて曲げ引張破壊であった。下段のステンレス鉄筋が腐食した N12-S8 のみ、顕著な耐荷性能の低下がみられた。今回実験を行った範囲では全供試体を通して、鉄筋の質量減少率に関わらず健全供試体に対して部材剛性、降伏荷重及び終局荷重に大きな低下はみられなかった。各供試体の降伏荷重、終局荷重は表-4 に示す。

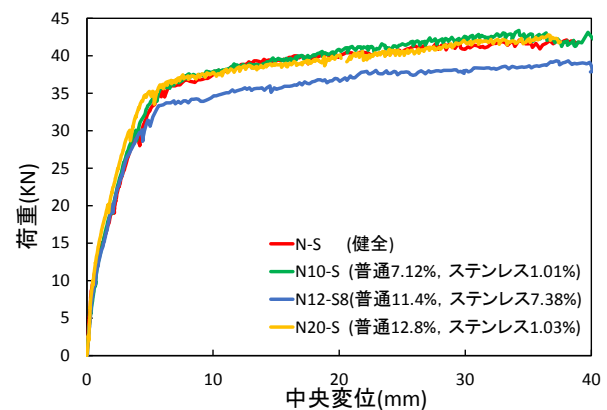


図-15 荷重－中央変位関係 (シリーズ 2)

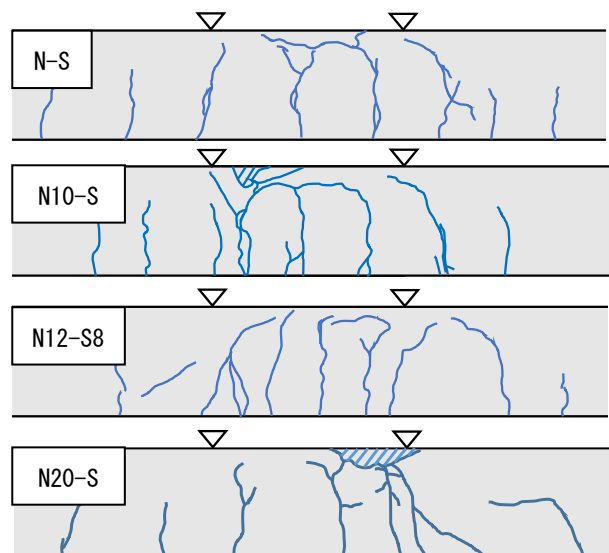


図-16 载荷ひび割れ図 (シリーズ 2)

(2) 質量減少率と降伏荷重比

図-14 に各供試体の降伏荷重比と主鉄筋の関係を示す。横軸は上段・下段を合わせた合計の鉄筋断面をもとにした腐食率である。降伏荷重比と平均質量減少率の関

係は BMT の結果と同じ傾向にあることが確認された。普通鉄筋の腐食により発生した腐食ひび割れがステンレス鉄筋の近傍に進展しても、今回のようにかぶりが剥落しない範囲の腐食であれば付着が損なわれることがなく、鉄筋の断面減少率から計算される以上には構造性能は低下しないことがわかった。

(3) 载荷による曲げひび割れ

図-16 に供試体の等曲げ区間に载荷による生じた曲げひび割れの性状を示す。健全供試体 N-S に比較して、N10-S、N12-S8 はひび割れ分散性状が大差なく、鉄筋の付着性状は損なわれていないことがわかる。しかし、N20-S はひび割れ間隔が大きくなっており付着が低下していることが推察される。すなわち、下段のステンレス鉄筋が腐食していない場合でも、上段の普通鉄筋の腐食の程度が大きくなれば、引張鉄筋全体としての付着が損なわれ、部材の耐荷性状に影響するほどではないもののひび割れ分散性に影響を及ぼす場合があることが明らかとなった。

5. 結論

- (1) ステンレス鉄筋がコンクリート中で腐食した場合、RC 部材の構造性能の低下の傾向は普通鉄筋を用いた場合と同様であることが確かめられた。
- (2) 鉄筋コンクリートはりにおいてステンレス鉄筋と普通鉄筋を併用使用した場合、上段の普通鉄筋より発生した腐食ひび割れが下段の健全なステンレス鉄筋周辺を経て、供試体底面に到達しても、ステンレス鉄筋が健全かつかぶりが剥落していなければ、鉄筋の断面減少率から計算される以上には構造性能は低下しない。ただし、普通鉄筋の腐食が著しいとコンクリートとの付着が低下し曲げひび割れ分散性が低

下する場合がある。

謝辞：本研究は、日本鋼構造協会ステンレス鉄筋の利用技術課題検討小委員会の検討課題の一環として行ったものである。委員の方々より有益なご助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 85，2009.5
- 2) 田森清美，丸山久一，小田川昌史，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988.
- 3) 日本コンクリート工学会：JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法，コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案），pp.1-4，1987.10
- 4) ステンレス協会：ステンレスの初歩 2007，pp. 84-88，2007.5
- 5) 土木学会：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針（案），コンクリートライブラリー130 号，2008.9
- 6) 山下諒輔，下村匠，山口貴幸，田邊純也：ステンレス鉄筋を用いた RC 部材の鉄筋腐食時の外観変状と構造性能の検討，土木学会第 71 回年次学術講演会，V-423，pp. 845-846，2016.9
- 7) 村松真伍，小林豊，下村匠：コンクリートの初期欠陥が鉄筋腐食による部材の力学性能低下に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp. 1351-1356，2009.3